電機産業における流体力学の二、三の問題*

内 田 幹 和**

1. は し が き

電機産業と呼ばれる産業分野で扱う製品は非常に多岐にわたっており、幾何学的な大きさで見ると、大は火力、原子力発電所から、小は IC, LSI などの半導体までにおよんでいる。このなかにはタービン、ポンプ、送風機、圧縮機などの流体機械と呼ばれる分野に属する製品で、本来、流体力学が製品開発の主役の一つをなしているものもあるが、多くのものは一見したところ、流体力学はあまり関係がないように見える。しかしそのような製品および製造技術のなかにも、基本的なところで流体力学の知識を必要とするものが多い。とくに最近のように、ほとんどの機器において、小型化、軽量化、高速化という意味で極限を追求していくことが要求されるときには、多少なりとも流体力学が関与している製品は、すべての分野といってもよいくらいに幅広い分野にあるといっても過言ではないし、また流体力学の知識の有無が機能を大きく左右するようになってきたのではないと思われる。このために流体力学を専攻する者が、その知識を基盤技術的な武器として、いままであまり関係がないと思われていた幅広い他分野に進出していくための社会的な環境はしだいに熟しつつあるように思う。

本稿では、紙面の都合もあって、電機産業において流体力学の関連するすべての問題を述べるわけにもいかなないので、そのなかでも進歩が非常に激しく、無関係のようにも見えるが、とくに流体力学を専攻する者が研究開発に関与することが強く望まれる半導体産業と、情報機器産業の問題をとりあげ、現状と将来の動向について解説を試みたい。

2. 半導体における問題

半導体産業においては高集積度化、すなわち一つの小さな(約5mm角)半導体素子基板(チップ)の上になるべくたくさんの回路を盛りこむことが技術上の一つの大きな流れになっている。この流れを示す一つの例として、半導体記憶装置の一つである MOS メモ

リの集積度の年次推移を第1図に示した。この図の横軸には年次を、縦軸には1個のチップの記憶容量を千ビット単位で示してある。この図によると、集積度は年々約2倍の割合で増加していることがわかる。この集積度の向上には、1個のチップの面積を大きくするとか、回路の工夫で同一チップ内に多くの記憶情報を持たせるようにするなどの方法がとられているが、これらの効果は小さく、大部分は回路パターンの微細化、すなわち単位面積当たりのビット数の増大によって達成されている。このために回路を構成するパターンの線幅も年々細くなり、'75年ごろには5 μm くらいであった最小の線幅も最近では3 μm から2 μm になり、近い将来には1 μm 以下も問題とされるようになるであろうといわれている。

このように微細化し、大規模集積回路(LSI)から超大規模集積回路(VLSI)へと進むにつれて問題となってくるものの一つに欠陥の少ない均質な結晶の製造技術がある。これまでは小さな欠陥、小さな場所での不均質があったとしても大きな問題にはならなかったものが、回路パターンの微細化に伴って問題となってくるのであり、この傾向は半導体の生産性向上という面からも将来ますます大きな問題となってくると思う。この結晶製造技術にはいくつかの方法があり、また技術革新を求めて新しい方法も提案されてはいるが、ここでは流体力学が大きな貢献をされると思われる基板を作るための融液からの結晶成長技術と、その基板の上に気相から結晶を成長させるための CVD (Chemical Vapor Deposition) 法について述べたい。

2.1 融液からの結晶成長 半導体産業で用いられているシリコン単結晶の製法には、チョクラルスキー法(Czochralski 法, CZ 法ともいう)と、フローティングゾーン法(Floating Zone 法, FZ 法ともいう)の2種類がある。現在はこのうち CZ 法が最もよく用いられている。

CZ 法の概念図を第2図に示した。石英製のルツボに入れて約1,400°Cに加熱したシリコン融液に、核になる種結晶を浸してからゆっくりと引き上げるのである。このときにできる結晶には、長さ方向にも、半径方向にも均質な(不純物分布が均一な)、またルツボから出る酸素の結晶中への混入が少なくなっているものが要求される。CZ 法では、熱的な軸対称性と、

* 昭和55年10月16日、第12回流体力学講演会にて特別講演として発表。昭和56年4月30日原稿受理 Some Research Subjects in Electrical Machinery Industry

** 日立製作所研究開発部 Motokazu UCHIDA

第1図 MOS メモリの集積度年次推移¹⁾

第2図 CZ 法による結晶成長法概念図²⁾

融液の攪拌のために種結晶は回転させられる。このときの回転数は、単に軸対称性を保つだけならば毎分10回転ぐらいでよいが、結晶の均質性を保つために融液と結晶の境界に不純物がたまらないようにすると、融液内の対流による温度変動に伴う結晶成長速度の変化をさけるために、種結晶の回転数を大きくするとか、種結晶ばかりでなくルツボも回転させるなどの方法がとられている²⁾。前述したように最近の半導体

では回路パターンが微細化しているために、また半導体の歩留まりを向上させるために、結晶の均質性は強く望まれ、またルツボ壁からの酸素の混入もなるべく少なくすることが望まれているし、作られる単結晶の直径も3インチから5インチへとしだいに大きくなりつつある。このような要求を満たすためにどのようにしたらよいかを知るには、回転や温度分布などによって生ずるルツボ内の融液に生ずる流れを正確に把握する必要がある。この流れは大別して次の4種からなっているといわれている²⁾。

- 1) 熱対流：融液加熱により生じ、第2図の矢印で示したように、ルツボの壁面で上昇し中央部で下降する流れ。
- 2) 結晶の回転による強制対流：上層部では遠心力により外向き流れが生じ、ルツボ壁に沿った下降流と、中央部でのルツボの底から結晶面へ向かった旋回流が生ずる。
- 3) ツルボの回転による強制対流：熱対流に似た流れであるが、中央部の流れは旋回流となる。
- 4) 旋回流と熱対流の共存：水平方向成分をもった粒子に作用するコリオリ力で熱対流が抑制される。

実際にはこれらがからみ合って複雑な流れが生ずる。CARRUTHERS ら³⁾は透明液体を使った可視化モデル実験により流れの把握を行ない、第3図に示したようないくつかの流れパターンが、種結晶とルツボの回転方向、回転数の差により生ずることを明らかにした。

第3図のルツボの実線矢印は流れのパターンを示しているが、破線は融液内にできる stagnation surface を概念的に示している。この stagnation surface とは、それよりも外側には、融液がルツボの回転とともに

第3図 結晶とルツボの回転方向および回転数の差による流れパターンの変化³⁾

に二次元的な剛体回転をする部分が、内側には回転する結晶下部の二次元的な流れを生ずる部分(Proudman cell)があるというように二つの領域を分ける面である。この面を通しては物質の混合は起こらない面である。このためにこの面がルツボの中に形成されるか否か、形成されるとしてどこに形成されるかは均質な結晶を作るために重要な意味をもってくる。CARRUTHERS ら³⁾は可視化モデル実験により, stagnation surface の生じない条件はルツボの回転数が結晶のそれに比して十分に小さいときのみであることを明らかにしている。また KOBAYASHI ら⁴⁾はルツボの回転がなく、かつ等温的である場合のルツボの中の流れの解析を行なっているが、その結果によると結晶半径を a 、結晶の回転数を ω_s 、融液の動粘性係数を ν としたときに $Re = a^2 \omega_s / \nu$ で定義されるレイノルズ数の大ききでルツボ内の流れは定まり、 $Re < 40$ では結晶近傍のみが攪拌されてルツボの中の大部分は静止しており、 $40 < Re < 700$ では強制対流域が軸方向、半径方向にしたいに広がっていき、 $700 < Re$ で強制対流域がルツボ内全域に広がって、ルツボの底から結晶下面に直接到達する流れが生じてくるといわれている。ここで興味のあることは結晶面近傍の軸方向の流れで、 Re により第4図に示すように変化することを示している。この図によるとちょうど結晶の端のところで軸方向速度は大きく変化していることがわかるが、これにより結晶成長を支配する結晶と融液の境界面での拡散境界層の厚さが半径方向に変化し、結晶の半径方向に縞状の不均質性が生ずるとしている。この解析では等温を仮定しているが、実際には加熱の方法によりこの仮定を実現することはむずかしく、熱対流も考慮した解析を行なって流れを把握する必要がある。半径方向の不均質にはこの熱対流が大きな効果をもっているともいわれている。熱対流を考慮した解析

第4図 結晶面近傍の軸方向速度のレイノルズ数 Re による変化⁴⁾

第5図 高周波加熱シリコンエピタキシャル装置のフローシート

もいくつかなされているし、またヒータと電源の工夫によって融液に回転磁場を加えることによって融液を回転させて結晶界面での境界層の厚さをまして結晶中の酸素濃度をへらしたという報告⁵⁾もあるが、不純物分布の均質性の改善がまだ課題として残されている。今後微小な部分での均質性まで要求され、本当に良い結晶を作るためには、正確な熱と流れの場の把握と、それをもとにした結晶成長法の改善策の提案が望まれる。最近では、熱対流を抑止するために宇宙船内という無重力の場での結晶成長の実験が計画されているし、またシリコン融液の電気伝導率が大きいことを利用して、2,000 Gauss以上の強い磁場をかけることによって熱対流を抑止し、温度変動を 0.1°C 以内におさえて均質な結晶を作るのに成功するとともに、ルツボ壁からの酸素が結晶中に入ることも防止できて酸素濃度の少ない結晶を作ったという報告もある⁶⁾。これなどは電磁流体力学の応用としても興味のあるところである。

2.2 気相からの結晶成長 融液から結晶成長などにより作られたシリコン単結晶を薄く切った基板(ウエファ)の上に、さらに一定の結晶学的方位関係をもった結晶を成長させる(エピタキス)ために、気相状態の反応性ガスからウエファの上にシリコン結晶を析出させるCVD法が用いられている。この方法はたとえば第5図に概略を示したように、石英製の管の中のサセプタの上にウエファをおいて、誘導加熱などにより加熱し、ガスからウエファ上に結晶を析出させるものである。このようなCVD法の問題は歩留まり向上のために、流れ方向にもまたそれと直角の方向にも均一な析出膜厚分布をもたせることであって、反応管内の流れと物質伝達が大きな問題となってくる。

TAKAHASHI ら⁷⁾は円形および矩形断面をもつ水平反応管の中に水平に鉄板を入れ、それを下から加熱し、反応管内のガス流量 $0 \sim 60 \text{ l/min}$ 、圧力 $160 \sim 760$

第6図 測定された膜厚分布の例。图中 z はサセプタ先端からの流れ方向距離。反応管は 120° の円形。結晶表面温度 $1,200^\circ\text{C}$ 、反応管と結晶面との温度差 800°C

第7図 横型反応管内の反応成分、速度、温度分布測定結果の一例¹⁾

Torr という条件下での流れの可視化実験を行なうとともに、矩形断面管内の流れと拡散の式から膜厚分布を求める解析を行なっている。この反応管の中ではガスの温度や、反応管壁の温度に比してサセプタの温度が高いから、自然対流と強制対流の混在した流れとなり、流量の小さい所ではスパイラル流れ、流量の大きい所では層流強制対流となっている。この二つの流れのパターンの遷移は $Gr/Re^2 = 0.4 \sim 4.1$ (Gr はグラスホフ数、 Re はレイノルズ数) の間で起こることを見いだしている。また理論解析によりスパイラル流れのときより、強制対流の強いときのほうが膜厚分布は一様になることを見いだしている。この解析はCVD法を流れの面から見た初期の仕事として重要な貢献をしてはいるが、一つの例として第6図に実験結果を示すような実際の膜厚分布を十分に説明できるようにはなっていない。これは上記の解析が発達した流れなどの仮定をした簡単なモデルによっているためと考えられている。これに対して BANN⁹⁾ は、実際に近い反応管モデル内での質量分析計による反応成分分布の測定や、温度分布の測定、流れの可視化による速度分布の測定などを詳細に行ない、その結果の一例を第7図に示すように分布していることを明らかにした。この結果から見ると、境界層は図中に破線で示したように発

達し、結晶を成長させるべきウエファ上の流れは発達した流れではなく、助走域の流れであることがわかる。BANN⁹⁾ は、実際に用いた 3cm の高さの反応管では、サセプタ先端から $40 \sim 45\text{cm}$ 、下流にいかないと発達した流れにならないことを示している。このように長い助走域をとってからでないとウエファをおけないのでは生産上不利益であるために、最近では三元混合流の助走域での流れの解析⁹⁾ なども行なわれ、膜厚分布を均一化する手法がさぐられている。

このように水平管内にウエファを水平においたときのCVD法の解析はいくつかなされ、実験的にも流れ方向の膜厚分布を均一にするためにサセプタの後端を少し持ち上げるようにしたほうがよいことなどがわかってはいるが、生産上はいくつかの欠点をもっている。すなわち、最近ではウエファの径が大型化しつつあるが、それに伴い反応管も不当に大型化すると、反応ガスの $60 \sim 70\%$ は未反応のまま放出されて効率がわるい、またサセプタからの輻射損失が大きくて、加熱のための電氣的な効率もわるいなどである。このような欠点を除き、量産向きの反応装置を作るための工夫がいくつかなされている。その一つが第8図に示したホットウォール型減圧シリコンエピタキシャル装置である。この装置では、半導体の特性を改善するために反応管内の圧力を $1/20$ 気圧位に減圧し¹⁰⁾、減圧下でのグロー放電抑制のために抵抗加熱とし、減圧下での拡散係数の増大を利用して量産性をあげるためにウエファを垂直に並べたものである。このようにすると前述の高周波加熱とは逆に管壁の温度はウエファの温度よりは高くなるし、ウエファに沿う流れではなく、それを横切る流れとなって、当然流れの様子は変わってくる。このような反応管内のガス流量と膜厚分布の関係を求める基礎的な研究¹¹⁾ もなされているが、良質な半導体を作るためには、垂直円板列の周囲の流れと拡散の問題が詳細に検討される必要がある。また最近では、第9図に示すような縦型の装置も使われて

第8図 ホットウォール型減圧シリコンエピタキシャル装置フローシート

第9図 縦型減圧シリコンエピタキシャル装置の構造¹⁰⁾

いるが、この場合にも石英ノズルから出る反応性ガスの噴流による、回転するサセプタの周囲の流れと拡散が一つの問題になる。

3. 情報機器における問題

情報機器といってもその種類は非常に多いが、ここでは流体力学が重要な役割を果たす磁気記憶装置について最初に述べる。磁気記憶装置には磁気ドラム、磁気ディスク、磁気テープなど各種のものがあがるが、いずれにおいても小型化のための記憶密度の増大が一つの大きな課題となっている。これらの装置は円筒面、円板面、テープなどに磁性材料を塗布し、それらを高速で動かすとともに、書きこみ、読み出しのための磁気ヘッドを磁性面に近づけて記憶、再生するものである。これらにおいては、磁性材料の問題も一つの大きな問題であるが、磁気面と磁気ヘッドの隙間(浮上量)をいかに小さくし、またいかにして安定させるかも大きな問題である。この問題について最近、研究開発が盛んに行なわれている磁気ディスク装置を例にとって述べたい。

記憶装置開発の初期のころには、磁気ヘッドを容器に固定する固定ヘッド型が用いられていたために、磁気面と磁気ヘッドの隙間を $20\mu\text{m}$ 以下にすることはできなかったが、1950年代後半には、回転面上に流体力学的な力で浮上させる浮動ヘッドが提案され、隙

第10図 傾斜平面スライダをもつ磁気ヘッド

第11図 磁気ディスク用浮動ヘッドの浮上量の年次推移

間を小さくすることができるようになった。この浮動ヘッドも初期のころには、加圧空気をふきこんで浮上させる静圧型が用いられていたが、最近では、たとえば第10図に示すように、磁気ディスクの回転に伴い発生する粘性流れを利用し、ディスクとスライダの間のくさび状の隙間に圧力を発生させる動圧型が用いられるようになってきた。この隙間に発生する圧力と、ピボットを介してバネにより与えられる押下げ力とのバランスでせまい隙間を保つのである。第10図には一つの例として、スライダの底面に傾斜平面をもつスライダを示したが、円筒面になっているものなど各種のスライダが提案されている。また第10図には、スライダの概略寸法を書きこんでいるが、全体の寸法に比し、傾斜面の寸法は桁違いに小さいことに注意されたい。また浮上量 h_0 は、記憶密度向上のために第11図に示すように、年々小さくなり、現在では $1.0\mu\text{m}$ 以下であり、近い将来、それは $0.4\mu\text{m}$ とか $0.2\mu\text{m}$ になるであろうといわれている。この磁気ヘッドには、隙間の微小化のほかに次のような性能も要求される。まず、磁気ディスクの内外周ではディスクの走行速度が異なるが、このような速度差のあるところでも一定の浮上量を保たねばならないし、また何らかの外乱がはいったときにも浮上量の変動を小さくおさねばならない。またディスクが静止しているときには磁気ヘッドはディスクに接触しているが、ヘッドの摩擦によるディスクの損傷を少なくするために、回転初期の速さのおそい所ですぐに浮上し、一定浮上量にはや

第12図 スライダ形状の一例
(正圧スライダ)

くおちつくことが必要である。このほか、摩擦損傷を小さくするためには、接触面積も小さく、接触面圧も小さくしなければならない。小さな力のかかる所で、小さな隙間を保って浮体力学的に安定に浮上させるためには、流体力学的な解析を詳細に行なわねばならないし、また多くの工夫も必要である。

このような問題の解析は、圧縮性流体の潤滑理論を適用して行なわれている¹²⁾。すなわち潤滑理論の基礎式であるレイノルズ方程式が等温変化を仮定し、スライダ周囲において圧力は大気圧に等しいという境界条件のもとに解かれている。潤滑理論においては圧縮性の影響を考慮するために compressibility number A ($=6\mu V l/p_a h_0^2$, μ は粘性係数, V は流速, l はスライダ長さ, p_a は周囲圧力, h_0 は最小浮上量)を導入しているが、普通の動圧気体軸受の場合と異なるところは浮上量 h_0 が非常に小さいので、 A の値が非常に大きくなって計算上問題が生ずる面があることである。また最近のスライダは接触面積を小さくするために、たとえば第12図に、普通の使用法とは逆に浮上面を上にして正圧スライダの形状を示したように、1mm以下と横幅のせまい“そり”のような形をしているために幅方向の流れが顕著になる可能性ももっている。このために短軸受近似を用いた解析も行なわれ、その結果として動圧によって生ずる浮上力に関しては厳密解とあまり変わらないが、圧力中心や動的な特性に関しては短軸受近似は誤差が大きいといわれている。また浮上量が小さくなれば当然分子の平均自由行程が問題になってくるし、第12図に示したスライダの溝の深さは数 μm であって、浮上量は1 μm 以下であるから、ディスクの面粗さの影響を考えねばならない。このようなことを考慮した解析もいくつかなされている¹²⁾。

スライダの浮上量がしだいに小さくなってくるときに問題になることのひとつに、スライダとディスク面との間の圧力が過大になることがあげられる。この圧力は概略浮上量の2乗に反比例して大きくなるが、小さな浮上量を保つためには、この圧力に抗して大きなバネ力でスライダを押し下げねばならない。そうするとディスクが運動を開始した初期のころのディスクとスライダの接触圧力が大きくなって損耗が大きくなるし、また少しの外乱でスライダとディスクとが衝突す

第13図 各種負圧スライダの例

る危険性も大きくなる。そのために最近では、普通の軸受とは異なり、いかにして圧力を小さくするかということが問題になってきている。そのために第12図に示したように圧力発生面を細くしてきたのであるが、浮上の安定性という面から見ると正圧を発生させるのみでは1 μm 以下の浮上量で浮上させるには不十分で、最近では第13図に例を示したように、正圧を発生させる面のほかに、負圧を発生させる面も作って積極的に負圧を発生させ、この正圧と負圧のプッシュプル作用によって安定性を上げようとする試みもなされている。すなわち、逆ステップ型においては、前面にポケットを設けるとともに、後部に深さ5 μm くらいの溝を切っておき、また逆テーパ型においては、溝の深さが後流に行くにしたがい深くなるようにして負圧を発生させている。田中ら¹³⁾は、この逆ステップ型負圧スライダについて解析を行ない、浮上量が0.5 μm 以下の低浮上モードと、1.0 μm 以上の高浮上モードの2種のモードが存在することを明らかにし、それらの押下げ力による影響、ピボット位置による影響などを明らかにしている。この2種の浮上モードが存在するのは、微小隙間のときには負圧面が本来の負圧発生機能を果たしているが、隙間が大きくなるとピボットまわりのモーメントのバランスを保つためにスライダの迎角が大きくなり、流入端の隙間が大きくなって負圧面で負圧を発生せず、正圧を発生してしまうためであるとしている。このように種々の工夫がなされているが、今後ますます隙間を小さくすることが要求されよう。極限としてどこまで隙間を小さくすることが可能か、浮上の安定性の問題も含め、周囲のガスの種類、圧力も変えて、流体力学的にしっかりした解析を行なって求めておく必要があろう。

以上磁気ディスクの記憶ヘッドの浮上の問題について述べたが、磁気テープ記憶装置にも同じような問題がある。この場合には、固定された磁気ヘッドの上を張力をかけられた磁気テープが高速で走行するものであって、解析的には気体軸受の一種のフォイル軸受と同等にあつかわれている。しかしテープの剛性を考慮しなければならないことと、磁気ヘッドの形状は必ずしも円筒形とは限らない点が気体軸受とは異なってい

第14図 フレキシブルディスク装置の概念図

る。田中¹⁴⁾は、無限幅を仮定した任意形状の磁気ヘッド上でのテープ浮上量を求める解析法をテープの剛性を考慮して開発し、円筒面が摩耗したときのテープ浮上量の変化¹⁵⁾を求めたり、浮上特性が良いといわれる非円筒面磁気ヘッド(円筒面の流入側に傾斜平面をもたせたもの)での浮上量の解析¹⁶⁾などを行なっているが、これらの解析での一つの問題は磁気テープの定常走行のみをあつかっていることである。実際に使われる場合には、磁気テープの走行、停止はひんぱんに行なわれるものであって、非定常状態での磁気テープの挙動が大きな問題となる。

また磁気記憶装置の小型・軽量化が材料面からも追求され、前述の磁気ディスクは金属円板に磁性材料を塗布したものであるが、金属の代わりにマイラーなどの薄いフィルムを使い、その上に磁気材料を塗布したフレキシブルディスクも提案されている。この場合には、第14図にその概念図を示したように、固定された板の上で円板を回転させ、中心部からはいり、遠心力により周囲にぬける空気流を利用してフレキシブルなディスクを一定の形状で安定に回転させるものであり、磁気ヘッドは磁気テープの場合と同様に固定板から若干突き出した固定ヘッドである。この装置の解析では、磁気テープのときには一方向の剛性のみを考慮すればよかったが、円板であるがために二次元的な剛性を考慮しなければならないことが磁気テープの解析とは大きく異なるところである。このような問題に対する解析¹⁷⁾や実験¹⁸⁾も行なわれてはいるが、まだ数は少ない。現在はまだフレキシブルディスクが使われている所は少ないが、今後、情報記憶装置の小型、軽量、低価格化が追求されるに伴い、この種のディスクが多用されるようになり、そのときには、記憶密度向上のために、フレキシブルディスクでの流体力学的な問題が大きくクローズアップされてくるのではないだろうか。

以上、情報機器のなかで磁気記憶装置を例にとって流体力学的な問題についていくつか述べた。情報機器のなかにはこの記憶装置のほかに、いくつもの装置が使われるが、そのなかのインクジェットプリンタも流体力学的に興味のある機器である。小さなノズルから規則正しく、小さな液滴を高速で噴出させる問題とか、帯電した液滴の電場内での挙動など、自由境界面

を含んだ非定常流体力学の問題¹⁹⁾として、また電気流体力学の問題として興味のある問題と思う。IBM社などでも研究がなされているが、今後この種のプリンタも高精細な画像などを高速で書くことが要求されるようになると思われ、液滴を噴出させるための圧力のかけ方、ノズルの形状などを含めて、流体力学的な検討が必要とされるようになるであろう。

4. あとがき

幅の広い電機産業という産業であつかう製品のなかから、一見流体力学とは無関係にも見える半導体と情報機器という二つをとりあげ、そのなかで流体力学がいかに重要な役割を果たすかにつき、筆者の勉強のおよぶ範囲内で概要を述べた。このほかにも、医用機器や、計測機器、また各種材料の製造技術に至るまで、筆者の周辺には技術の進展のために流体力学が多かれ少なかれ効果を発揮する問題が数多くある。とくに最近のように極限技術の追求が強く望まれるときには、ますますそのような問題が多くなっていくものと思う。これらの工学の進歩発展のためには、各種の技術者が広い分野にわたって関心をもち、一つの技術の横への展開を図って協力を密にすることがぜひとも必要であると思う。流体力学の問題は非常に多いから、流体力学という基礎のしっかりした学問を修得した研究者は、それを基幹の技術として横への展開を図ってゆくのに非常に有利な条件下にあるとも考えられる。筆者のつたない本解説が、これから他分野へ進出しようという人々にとって、いくらかでも参考になれば望外の幸である。

終りにあたり、本解説執筆の機会を与えてくださった、東京大学 相原教授に厚くお礼を申し上げるとともに、半導体関係では、日立製作所中央研究所の高橋研究員に、また情報機器関係では日立製作所機械研究所の田中主任研究員に、文献を借用させていただいたり、技術的な面でご教示をいただいたことを記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) HITACHI Semiconductor News, Gain, No. 25 (1981. 5).
- 2) DRAPER, R.C.J.: Crystal Pulling, *In* Crystal Growth (PAMPLIN, B.R. ed.), Pergamon Press (1975), chap. 2, pp. 477-520.
- 3) CARRUTHERS, J.R. and NASSAU, K.: Nonmixing Cells due to Crucible Rotation during Czochralski Crystal Growth, *J. Appl. Phys.*, Vol. 39, No. 11 (1968/11), pp. 5205-5214.
- 4) KOBAYASHI, N. and ARIZUMI, T.: Computational Studies on the Convection Caused by Crystal Rotation in a Crucible, *J. Crystal Growth*, Vol.

- 49 (1980), pp. 419-425.
- 5) HOSHIKAWA, K., KOHDA, H., HIRATA, H. and NAKANISHI, H.: Low Oxygen Content Czochralski Silicon Crystal Growth, Jap. J. Appl. Phys., Vol. 19, No. 1 (1980/1), pp. L33-L36.
- 6) 星 金治, 伊沢伸彦, 鈴木利彦: 2000G以上の磁場を加えたシリコン単結晶の引き上げ法, 日経エレクトロニクス, 9月15日号 (1980), pp. 154-175.
- 7) TAKAHASHI, R., KOGA, Y. and SUGAWARA, K.: Gas Flow Pattern and Mass Transfer Analysis in a Horizontal Flow Reactor for Chemical Vapor Deposition, J. Electrochem. Soc., Vol. 119, No. 10 (1972/10), pp. 1406-1412.
- 8) BANN, V.S.: Fundamental Studies and Reactor Design in Silicon Epitaxy, J. Jap. Assoc. Crystal Growth, Vol. 5 (1978), pp. 119-139.
- 9) 高橋亮吉, 小切間正彦, 牧 道義: 混合流動走域のガス流動と CVD 特性の解析, 第40回応用物理学会講演予稿集 (1979), pp. 548.
- 10) 小切間正彦, 齊田広二, 牧 道義: シリコン基板からのオートドーピングを少なくする低圧エビタキシャル技術, 日経エレクトロニクス, 4月17日号 (1978), pp. 108-127.
- 11) 高橋亮吉, 小切間正彦, 牧 道義: 減圧ホットウォール法によるシリコン・エビタキシ (I), 第42回応用物理学会講演会予稿集 (1980), pp. 593.
- 12) 金子礼三: 磁気記憶装置の浮動ヘッド, 日本機械学会誌, 79巻, 690号 (1976/5), pp. 449-454.
- 13) 田中勝之, 尾高聡子, 竹内芳徳, 斉藤翼生, 中村富雄: 逆ステップ形負圧スライダの浮上特性, 日本機械学会講演論文集, No. 810-4 (1981/4), pp. 114-116.
- 14) 田中勝之: 磁気テープ浮上の研究 (第1報), 日本機械学会講演論文集, No. 790-5 (1979/5), pp. 88-90.
- 15) 田中勝之: 磁気テープ浮上の研究 (第2報), 日本機械学会講演論文集, No. 790-10 (1979/7), pp. 238-240.
- 16) 田中勝之, 大浦正樹, 藤井正孝: 磁気テープ浮上の研究 (第3報), 日本機械学会関西支部第55期定期総会講演会論文集 (1980/3), pp. 45-47.
- 17) PELECH, I. and SHAPIRO, A.H.: Flexible Disk Rotating on a Gas Film Next to a Wall, Trans. ASME., Jl. Appl. Mech. (1964/12), pp. 577-584.
- 18) 金子礼三, 小口重光: 可機円板を記録媒体に用いたディスクメモリの試作, 電子通信学会, 磁気記録研究会資料, 資料番号 MR 71-3 (1971/4), pp. 1-11.
- 19) 河村哲也, 海老 豊: 微小なノズルから出たジェットのみるまい, 第12回流体力学講演会講演集 (1980/10), pp. 68-71.

＝ 会 告 ＝

航空日記念特別講演会

毎年恒例の航空日を記念しての「特別講演会と映画の夕べ」を次のとおり開催しますので奮ってご参集下さい。

共 催:	日本航空協会, 日本航空技術協会, 日本航空宇宙学会 (幹事学会)	本社 2 階)
後 援:	朝日新聞社	定 員: 先着順 300 名
日 時:	昭和 56 年 9 月 18 日 (金) 午後 5 時開場 5 時 30 分開演	特別講演: 「ハンググライダー」 東京大学教授 東 昭氏
場 所:	朝日新聞社ホール (東京都中央区築地 5-3-2 朝日新聞東京	映 画: 航空映画 「スカイライダー」20 世紀フォックス配給

「航空日記念合同祝賀会」について

本年も 9 月 20 日の航空日を祝う日が近づいて参りました。今年も第 29 回航空日記念パーティーと第 19 回航空人まつりとを合同して行うこととなりました。気楽に参加できる楽しい年中行事として、皆さまお誘い合わせの上、初秋の一夕をお過ごし下さい。

日 時: 昭和 56 年 9 月 18 日 (金) 17 時 30 分～20 時
会 場: 東京プリンスホテル・鳳凰の間 (立食パーティー式)
会 費: 6,000 円

祝賀会行事: イ, 航空安全祈願ならびに航空殉難者慰霊献花

ロ, 頭彰式 (17 時 30 分～18 時)

ハ, 抽せん会 [JAL, ANA, TDA 航空券その他協賛商品多数 (抽せん開始: 19 時 15 分)]

詳細問合わせおよび申込先:

日本航空協会 (〒105 港区新橋 1-18-2)
航空会館分館 TEL (03) 502-1201]